•Wärmelehre

•Energiesatz : $W_{ges} = W_{kin} + W_{pot} = \text{konst}$

$W_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$

•Arbeit: - Mechanik $\Delta W = \int_1^2 dw = \int_1^2 F \cdot ds$

-Gase $\Delta W = \int_1^2 p \cdot A \cdot ds = \int_1^2 p \cdot dv$

Expansion: $v_2 > v_1$; $\Delta W > 0$

$v_2 < v_1$; $\Delta W < 0$

•1. Hauptsatz: $dQ = dU + p\, dv$

•Die Wärmeenergie ΔQ: $[Q] = 1J = 1Nm = 1Ws$

$\rightarrow \Delta Q = m\, c\, \Delta T = m\, c\, (T_2 - T_1)$

$[T] = 1K$ $[\vartheta] = 1°\,C$

[c] = spezifische Wärmekapazität = 1 J/(kg K)

[C]= m c = Wärmekapazität = 1 J/K

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

•Ideale Gase:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konst}$$

Allg.Gaskonstante: R = 8314 J/(kmol K)

Stoffmenge n [n] = 1kmol

1 mol eines belieb. Stoffes enthält 6,022 E23 Teilchen

•Avogadro-Konst./Loschmidtsche Zahl: N_A

$N_A = L = 6{,}022\text{ E}23$ 1/mol

Definition: $M_r = \sum A_r$

$m_m = M_r$ 1 kg/kmol $= M_r$ 1 g/mol $\quad n = \frac{m}{m_m}$

$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \qquad n \cdot R = m \cdot R_S$

•Spezifische Gaskonstante R_S : $R_S = \frac{R}{m_m}$

$p \cdot V = n \cdot R_S \cdot T$

•Isochore Zustandsänderung:

$$\Delta Q_v = \int_1^2 dQ_v = \int_{T1}^{T2} m \cdot c_v \cdot dT = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

$$c_v = \frac{1}{m} \cdot \frac{dU}{dT} \qquad dQ_v = m \cdot c_v \cdot dT$$

•Isobare Zustandsänderung:

$$c_p = \frac{1}{m} \cdot \left(\frac{dQ}{dT}\right) \qquad \Delta Q = \Delta W + \Delta U$$

$$\Rightarrow\ dQ_p = p \cdot (V_2 - V_1) + m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

•Zus.hang zw. c_v und c_p :

$c_p > c_v \Rightarrow \Delta Q_p > \Delta Q_v$ für ΔT = konst.

•Wirkungsgrad f. Expansion: $\eta = \frac{\Delta W}{\Delta Q}$

•Adiabatenexponent: χ $\eta = \frac{\kappa - 1}{\kappa}$ für p =konst.

•Isotherme Zustandsänderung: $p\, v = \text{konst}$

1.Hs. : $U = \text{konst}$; $dU = 0 \Rightarrow dQ = dW$

$\Rightarrow \Delta Q = \Delta W$

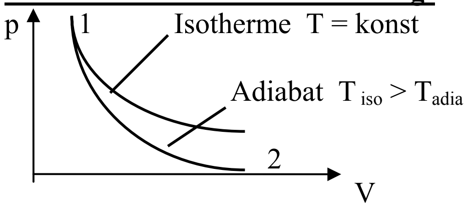
- Arbeit:

$$\Delta W = \int_{V1}^{V2} p \cdot dV = \int_{V1}^{V2} \frac{n \cdot R \cdot T}{V} dV = n \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$V_2 > V_1 \Rightarrow \Delta W > 0$

$V_2 < V_1 \Rightarrow \Delta W < 0$

•Adiabatische Zustandsänderung:



ΔW_{ad} wird dem U entnommen $\rightarrow$ T sinkt

$\Delta W_{ad} > 0$; $\Delta U < 0$ $\Rightarrow$ T sinkt

$\Delta Q = 0 = \Delta U + \Delta W \quad \Delta U = -\Delta W$

Adiab.glg: $p \cdot V^\kappa = \text{konst}$; $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_{mp}}{c_{mv}} > 1$

Arbeit: $\Delta W = -\Delta U = -m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$

$p\, V^n$ = konst: $\Rightarrow$ **Polytropenexponent n** $< \kappa$

n ist maschinenabhängig

•Der 2. Hauptsatz:

$\eta = \frac{\Delta W}{\Delta Q} < 1$; $\Delta W > 0$; $S \equiv$ Entropie

•Carnotscher Kreisprozeß:

Jeder Maschine, die längere Zeit mech. Arbeit liefern soll, muß ein period. Vorgang zugrund.liegen Aus Wärme kann mit einer period. arbeit. Masch. nur mech. Arbeit gewonnen werden, wenn gleichzeit. ein Teil der Wärmemenge von einer höheren auf eine tiefere Temp. gebracht wird.

$$\eta_C = \eta_{revers} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

ΔS = k ln ω = Maß f.d. Nichtumkehrbarkeit eines Vorgangs = Maß f.d. Änd. d. thermodyn. Wahrscheinlichkeit.

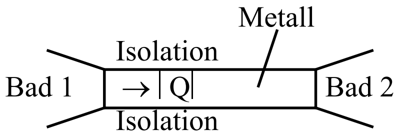
$\Delta S > 0$ irreversibel (Nur bei Teilprozeß. $\Delta S < 0$)

$\Delta S = 0$ reversibel $[S] = 1$ J/K

Isotherme: $\Delta S = \Delta Q_{revers.} / T$

Adiabat. Teilproz.: $\Delta S = 0$ weil $dQ = 0$ff

•Beisp. irreversibl. Prozeße:
abgeschl. System $T_2 < T_1$
- **Bsp.**: Wärmeleitung:



$$\Delta S = \frac{-|Q|}{T_1} + \frac{|Q|}{T_2} > 0 \quad \text{weil } T_1 > T_2$$

- **Bsp.**: Zustandsänderung fester, flüßiger Stoffe

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{rev}}{T} = \int_1^2 \frac{m \cdot c \cdot dT}{T} = m \cdot c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$$

!! Wenn $T_1 > T_2$ für Teilprozeß auch $\Delta S < 0$ mögl.

- **Bsp.**: Ideale Gase
Voraussetzg. c_V ,c_P = konst:

$$\Delta S = m \cdot c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + m \cdot R_s \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{für Teilprozeß}$$

$$\Delta S = m \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - m \cdot R_s \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{(V durch p ers.)}$$

•Statistische Deutung der Entropie:
GesVol. V_2 ; Vol. pro Zelle V_1 ; x - Zellen
T = konst.
- WK w_1 1 Molekül in V_1 zu finden:

$$w_1 = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{x}$$

- WK w_2 gleichzeit. 2 Molek. in V_1 :

$$w_2 = w_1^2 = \frac{1}{x^2}$$

- WK für N-Stück: $w_N = \left(\frac{1}{x}\right)^N = w_1^N$

Def.: Thermodyn Wahrscheinlichkeit:
Gibt an, um wieviel mal wahrscheinl. alle Molek. gleichzeit. in V_2 anzutreffen als in einem Teilvol. V_1

$$w = \frac{w_g}{w_N} = x^N \Rightarrow \ln w = \ln x^N \,;\; k = \frac{R}{N_A} =$$

Bolzm.

$$\ln x^N = N \cdot \ln x = n \cdot N_A \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = \ln w$$

$$\ln w = n \cdot \frac{R}{k} \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow$$

$$k \cdot \ln w = n \cdot R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = \Delta S$$

$\Rightarrow \Delta S = k \cdot \ln w$ für T = konst.

•Kinetische Wärmetheorie:
- Braunsche Molekularbewegung
- Entstehung des Gasdrucks:
  $m_0 = m_m / N_A = A_r \cdot u$
  u = Atom. Masseneinh. = 1,661 E-27 kg
- Druck auf Wand der Fläche $A = a^2$

$$p = \frac{\overline{F}}{A} = \frac{\overline{F}}{a^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{m}{a^3} \cdot \overline{v}^2$$

- Boyle-Mariotte-Gesetz

$$p = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \overline{v}^2 \quad ; \quad \rho = \frac{m}{V}$$

$$\Rightarrow p \cdot V = m \cdot R_S \cdot T \Leftrightarrow \rho \cdot \frac{m}{V} = R_S \cdot T = \frac{p}{\rho}$$

$\Rightarrow$ für best. Gase.: $\quad v_m = \sqrt{3 \cdot R_S \cdot T} \approx \sqrt{T}$

• Die innere Energie der Moleküle:
- Translation = Fortbeweg. d. Schwerpkt.
  in 3 Raumrichtungen

$$\left.\begin{array}{l} p \cdot V = n \cdot R \cdot T \\ p \cdot V = \frac{1}{3} \cdot m \cdot \overline{v}^2 \end{array}\right\} \frac{1}{2} \cdot m_m \cdot \overline{v}^2 = \frac{3}{2} \cdot R \cdot T$$

- Mittl. kin. E. d. Translation f. ein Molekül

$$\overline{W_{Kin,0}} = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot \overline{v^2} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$$

Def.: Zahl der Freiheitsgrade „ f “ eines Moleküls
für die Energiespeicherung
- 3 unabh. Raumrichtg. : f = 3

$$\overline{W_{Kin,0}} = f_{tr} \cdot \frac{1}{2} \cdot k \cdot T = f_{tr} \cdot \overline{W_f}$$

→ 1-Atom-Molekül (keine Rotat.) f = 3
→ 2-Atom-Molekül (Rotation) f = 2
→ 2-Atom-Molekül (Schwingung) f = 2
→ 3- und mehr. At. (Schwing.) f $\geq$ 2
→ 3- und mehr-Atom. Molek. (gewinkelt) f = 3

• Die innere Energie U :
U ist die E, die aus W_{kin} und W_{pot} der Translation,
Rotation und Schwingung d. Molek. zusammengesetzt ist.

$$U_m = N_A \cdot \overline{W_0} = \frac{f}{2} \cdot R \cdot T = m \cdot \frac{f}{2} \cdot R_S \cdot T$$

•Molare Wärmekapaz. c_m bei Festkörpern :
6 Freiheitsgrade der Energiesp. : f = 6 (W_{pot} + W_{kin})

$c_m = \frac{6}{2} \cdot R$ Gute Übereinstimmg. f. Metalle ;
schlecht für Gase und Flüßigkeiten

• Transportvorgänge in Gasen u. Flüßigkeiten :

- Diffusion: Durchmischung nur wegen der statisch. Molekülbewegung, d.h. Teilchentransport
- Innere Reibung:
  a) Kohäsion: Kräfte zw. Molekülen
  b) Flüßigkeits- o. Gasmoleküle „kleben" an Festkörper-Oberflächen
- Kräfte der Inneren Reibung: $\vec{F}_R = -k \cdot \vec{v}$
  (äußere Reibung: $F_R = \mu \cdot F_N$)
- Mittl. freie Weglänge (Weg ohne Zus.stöße)

$$\overline{\lambda} = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot d^2 \cdot N_V}$$

• Barometrische Höhenformel :

$$p(h) = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{p_0}}$$

- in molekularer Form

$$p(h) = p_0 \cdot e^{-\frac{m_0 \cdot g \cdot h}{k \cdot T}}$$

$\Delta W = \Delta W_{pot} = m_0\, g\, h$ eines Molek. in d. Höhe h

Umformung : $p = N_V\, k\, T$

$$N_V(h) = N_V(0) \cdot e^{-\frac{\Delta W}{k \cdot T}}$$

• Die Maxwell'sche Geschw.keitsverteilung :

$$f(v) = \frac{dN(v)}{dv} = \frac{4 \cdot N \cdot v^2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{m_0}{2 \cdot k \cdot T}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{\frac{-0.5 \cdot m_0 \cdot v^2}{k \cdot T}}$$

v_h = häufigste, wahrscheinlichste Geschw.keit

$$v_h = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T}{m_0}}$$

• Wellenlehre:

•Harmonische Schwingung:

$$y(t) = \hat{y} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0)$$

- Nullphasenwinkel : $\varphi(t) = \omega_0 \cdot t + \varphi_0$
- Kennkreisfrequenz : $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 = \dfrac{2 \cdot \pi}{T_0}$

•Harmonische Wellen

- Energiedichte: $w = \dfrac{dW}{dV}$ $[w] = 1\ J / m^3$

$$w = \frac{\Delta W_{Kin}}{\Delta V} + \frac{\Delta W_{pot}}{\Delta V}$$

- Harmonische Schwing. : $\overline{W_{pot}} = \overline{W_{Kin}}$
  (gilt für jeden Punkt der Wellenausbreitung)
- Gesamte mittlere Energiedichte :

$$\overline{w} = \overline{\left[\frac{\Delta W}{\Delta V}\right]} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \hat{v}^2 \quad \text{mit} \quad \hat{v} = \hat{y} \cdot \omega$$

- Intensität S :
  (Energie , die pro Zeit durch Fläche A strömt)

$$S = \frac{dP}{dA} \; ; \; S = \frac{P}{A} = w \cdot c = \text{mittl.E} - \text{dichte}$$

$$S = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \hat{v}^2 \cdot c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \hat{y}^2 \cdot w^2 \cdot c \;\Rightarrow\; S \cong \hat{y}^2$$

• Elektromagnetische Wellen :

Erzeugung durch Dipole, Dipollänge verantwortl. f. λ ; breites Spektrum

$$c = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2{,}998E8 \frac{m}{s} \; ; \; l = k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

• Überlagerung harmonischer Wellen :

Phasendifferenz δ im Überlagerungspkt. :

1.) Gleichphasig: $\delta = \pm k \cdot 2 \cdot \pi$ K = 0, 1, 2 ...

2.) Gegenphasig: $\delta = \pm (2k + 1) \cdot \pi$ K = 0, 1, 2 ...

Spezialfälle:

- 2 Wellen, gleiches λ , gl. Schwingungsrichtg.
  Δ = Laufwegunterschied beider Wellen:
  $\delta = 2 \cdot \pi \cdot (\Delta / \lambda)$
- Beide Wellen werden gleichphasig angeregt:
  zu 1.) : $\Delta = \pm k \cdot \lambda$
  zu 2.) : $\Delta = \pm (2k + 1) / 2 \cdot \lambda$

• Mech. Wellen (F.. Zugkraft d. Seiles)

Fortpflanzungsgeschw. einer Seilwelle: $c = \sqrt{\dfrac{F}{\mu}}$

'' einer elastischen Welle

- in festen Stoffen: $c = \sqrt{\dfrac{E}{\rho}}$ (E..Elastizitätsmodul)
- in Flüßigkeit. : $c = \sqrt{\dfrac{1}{\chi \cdot \rho}}$ (χ Kompress.tät=-1/v)
- in Gasen: $c = \sqrt{\dfrac{\chi \cdot p}{\rho}} = \sqrt{\chi R_s T}$; $\left(\chi = \dfrac{c_p}{c_v}\right)$

• Wellenoptik

Brechzahl: $n = \dfrac{c_0}{c}$; $c_o = 2{,}998E8$ m/s

Brechgesetz: $\dfrac{\sin\varepsilon_1}{\sin\varepsilon_2} = \dfrac{c_1}{c_2} = \dfrac{n_2}{n_1}$

wenn $n_1 < n_2 \Rightarrow$ Med.1 ist optisch dünner als Med.2 (u.umgekehrt)

Grenzwinkel (d. Reflekt.): $\sin\varepsilon_{1G} = \dfrac{n_2}{n_1}$

Kohärenzlänge: $l_k \propto \dfrac{1}{\Delta\lambda}$

Beugung: Maxima: $\sin\varphi = \dfrac{k \cdot \lambda}{b}$; $K = 1,2,3..$

Minima: $\sin\varphi = \dfrac{2k+1}{2} \cdot \dfrac{\lambda}{b}$; $K = 1,2,3..$

Ordnung k der Maxima

Interferenz: (Bsp. Gitter)

Maxima: $\sin\varphi = k \cdot \lambda / g$; $k = 0,1,2,3...$

Minima: $\sin\varphi = \frac{2k-1}{2} \cdot \frac{\lambda}{b}$; $K = 1,2,3..$

•Doppler Effekt

•Mechanische Wellen

1. Empfänger bewegt sich m. v_e; Quelle ruht:

$$f = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{v_e}{c}\right)$$

2. Empfänger ruht, Quelle bewegt. m. v_Q

$$f = \frac{f_0}{1 \pm \frac{v_Q}{c}}$$

Näherung: $f \approx f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{v_Q}{c}\right)$; $\left|\frac{v_0}{c}\right| << 1$

3. Q, E ruhen, reflektierende Wand bewegt. m. v_W

$$f_{1W} = f_0 \left(1 - \frac{v_W}{c}\right) \quad ; \quad f_{2E} = f_0 \frac{1 - v_W / c}{1 + v_W / c}$$

•Elektr.magnetische Wellen

$$f = f_0 \left(1 \pm \frac{v}{c}\right) \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

+ relat. Annä herung

− rel. Entfernung

$v << c$: $f \approx f_0 (1 \pm v / c)$

•Temperaturstrahlung

1. Wärmeleitung: Weitergabe der Wärmeenergie v. Molekül zu Molek. durch Stöße.Man kann v. Diffus. zusätzl. kinetischer Energie sprechen.

$$\left|\frac{\Delta Q_{th}}{\Delta t}\right| = \lambda \cdot A \cdot \left|\frac{\Delta T}{\Delta x}\right|$$; λ ...Wärmeleitkoeff.

1W/(K·m)

$T_1 < T_2$

A

ΔT

Δx ΔQ_{th} T_2

Wärmeleitung einer Platte

2. Konvektion(Wärmeströmung): Energie wir mit Materie transportiert.

$$\frac{\Delta Q_k}{\Delta t} = \alpha_k \cdot A \cdot \Delta T \qquad \Delta T = T_2 - T_1$$

α_k ... Wärmeübergangskoeff.

3. Temp.strahlung: Energietransport d. elektr.magn.

Strahlung

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_k}{\Delta t} + \frac{\Delta Q_S}{\Delta t}$$

Stefan-Bolzmann-Gesetz (f. abgestrahlte Leistung)

$$\Phi = \frac{dW}{dt} = \frac{dQ_S}{dt} = \sigma A T^4$$

Wienschen Verschieb.gesetz:

$$\lambda_p \cdot T = 2{,}898E - 3mK$$

Schwarzer Körper: Abgestr. Leistg. eines SK(T_1) an seine Umgebung.

$$\Delta\Phi = \Delta \dot{W} = \sigma A \left(T_1^4 - T_2^4\right) \quad (T_2 < T_1)$$

Emissionsgrad (Schw.Strahl. = 1):

$$\varepsilon(T) = \frac{M}{M_S} = \frac{\Phi}{\Phi_S} < 1$$

Gesamte abgestr. Leistg. : $\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 = \varepsilon \cdot \Phi_S$

•Relativistisch-Klassisch:

Klassisch: $W_{kin} = m_0/2 \cdot v^2$; $P = m_0 \cdot v$

$W_{kin} = p^2 / (2 \cdot m_0)$

Relatetisch.: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ $\qquad p = m \cdot v$

$W_{kin} = (m - m_0) \cdot c^2 \qquad W = \sqrt{\left(m_0 c^2\right)^2 + p^2 c^2}$

•Relatevistische Dynamik:

$W_{kin} = \frac{m_0}{2} \cdot v^2$!!!! Die Klass. Mech. ist als Grenz-fall i.d. relatev. Mechanik enthalten

•Zusammenhang zw. v, u, m_0, q gelad. Teilch.

$W_{kin} = q \cdot U$; $W = W_0 + W_{kin} = m_0 \cdot c^2 + q \cdot U$

klassisch: $v = c \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m_0 \cdot c^2}}$ für $v << c$

Faustregel: Ab U > 5 kV (keV) relatev. rechnen

• Der Strahlungsdruck

$p_s = \frac{|\vec{F}|}{A}$ = pro Zeit auf Wand übertrg. Impuls

Bsp.: Photon: $|\vec{p}| = mc = \frac{hf}{c}$

Elastischer Stoß: $p_s = 2 \cdot N_v \cdot hf$

• Materiewelle

$\lambda = \frac{h}{mc}$ mit $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ $\qquad W_p = h f = h c/\lambda$

Interferenzen

$\sin\lambda = k \cdot \lambda/(2d)$ mit k = 1,2,3

•Heißenbergsche Unschärferelation

Impuls und Ort nicht gleichzeitig exakt meßbar:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

•Bohrsche Quantenbedingung

$2 \cdot \pi \cdot r \cdot m \cdot v = n \cdot h$ n .. Hauptquantenzahl

•Röntgenstrahlung:

Grenzwellenlänge des Bremsspektrums

$f_{gr} = \frac{eU}{h}$; $\lambda_{gr} = \frac{hc}{eU}$

• Lebensdauer angeregt. Zustände:

$\frac{dN}{dt} = -\lambda_Z \cdot N$; mittl. Lebensdauer: $\tau = \frac{1}{\lambda_Z}$

• Verhalten eines Festkörp. bei Temp.änderg.

-Fermi-Energie W_F : Energie, bis zu der bei T=0 die Auffüllung m. e^- möglich ist.

-Valenzband V: oberstes bis T=0 volles Band

-Leitungsband L: darunter liegendes Band

-elekt. Leitfähigkeit κ : $\kappa = e \cdot n \cdot \mu_n$

-Ladungsträgerdichte d. Elektr.: n = N/V

-mittl Driftgeschw. $\overline{v}$; $\mu_n = \frac{\overline{v}}{e}$

-Fermi-Dirac-Verknüpfungsfunktion:

$f(W) = \frac{1}{e^{\frac{W-W_F}{k \cdot T}} + 1}$; für Löcher: $f_{Löch}(W) = 1 -$ f(W)

-Halbleiter: $\Delta W < 3eV$; $\Delta W = W_L - W_V$

-Eigenleitungsdichte: $n = p = n_i$; $n_i = n_i$ $(T, \Delta W)$

$n_i \uparrow$, wenn T $\uparrow$, wenn $\Delta W \downarrow$

-Gitterschwingungen: wenn T$\uparrow$, dann $\downarrow$ μ_n und μ_p

-Metall : W_F im L-Band bei $T \to 0$ schon freie e^-

-Halbleit/Isolat.: W_F in der verbot. Zone

$\frac{dn}{dW} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot D_L(W) \cdot f(W)$ für e^-

$\frac{dp}{dW} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot D_V(W) \cdot (1 - f(W))$ für Löcher

-reine Halbleiter: $W_F = \frac{1}{2} \cdot (W_V - W_L)$

-Elektr.-Loch-Paar durch Photon erzeugten:

! $W_p = h \cdot f \geq \Delta W$ d.h. $h \cdot f_{min} = \Delta W$

-Langwellige Grenze: $\lambda_{max} = \lambda_{gr} = \frac{c \cdot h}{\Delta W}$

-Donatorendichte: $N_D \approx n = \frac{\text{Donatorenzahl}}{\text{Volumen}}$

-N-Typ Halbleiter (Fermi-Dirac Statistik)

T=0 Keine D ionisiert $\Rightarrow W_{F,D} = \frac{1}{2}(W_D + W_L)$

T>0 $\Rightarrow W_{F,D} = f(T, N_D)$

$n \cdot p = n_i^2$ Reiner HL : $n = p = n_i$

N-Typ : $n >> p$; $n \approx N_D$

-P-Typ-Halbleiter

$\Delta W = W_L - W_V$

T=0 : $\Rightarrow W_{F,D} = \frac{1}{2}(W_V + W_A) < W_A$

T>0 $n \cdot p = n_i^2$; $p >> n$